

상용해석 코드(MSC-Marc)를 활용한 노즐 내열부품의 숯/삭마 해석 기법

김연철

Thermal decomposition and ablation analysis of solid rocket nozzle using MSC.Marc

Yun Chul Kim

ABSTRACT

A two-dimensional thermal response and ablation simulation code for predicting charring material ablation and shape change on solid rocket nozzle is presented. For closing the problem of thermal analysis, Arrhenius' equation and Zvyagin's ablation model are used. The moving boundary problem and endothermic reaction in thermal decomposition are solved by rezoning and effective specific heat method. For simulation of complicated thermal protection systems, this method is integrated with a three-dimensional finite-element thermal and structure analysis code through continuity of temperature and heat flux.

초 록

고체추진기관의 연소 환경에서 복잡한 형상을 갖는 내열 복합재료의 온도 및 밀도분포를 예측할 수 있는 방법을 개발하였다. 복합재료의 내부 열반응은 Arrhenius 모델을 이용하였으며, 표면 삭마반응은 Zvyagin 이론을 사용하였다. 표면 삭마에 의한 경계조건 및 격자 이동은 Rezoning 기법을 사용하였으며 열분해에 의한 흡열반응 효과는 열분해 가스의 조성비에 기준한 유효 비열 값을 이용하여 계산되었다. 형상이 복잡한 부품으로 이루어진 2차원 축대칭 노즐 조립체에 적용된 방법은 향후 3차원 FEM 열구조 해석에 활용을 목표로 발전될 것이다.

Key Words: TGA(열중량분석기), Thermal Decomposition(열분해), Ablation(삭마), Solid Rocket nozzle(고체추진기관 노즐)

1. 서 론

열차폐 물질의 분해 반응 기구에 관한 관심은 60년대에 우주발사체 기술로 대표되는 항공우주 공학에서 비롯된다. 특히, 미국과 러시아로 양분되어온 우주 과학 기술은 당시에 존재했던 탄소계 및 유기계 복합재료의 분해 기구를 정립하기

위하여 많은 실험이 진행되었다. 고체 추진기관에 사용되는 내열 복합재료의 열분해 및 삭마 현상을 정확히 예측하기 위해서는 해석 프로그램, 경계조건 및 재료 물성이 정확히 주어져야 한다. 내열 복합재료의 열분해 반응 기구는 고체, 액체 및 기체상에서 이루어지는 복잡한 반응이기 때문에 실제 상황을 모사하기 위해서는 실험 방법의 선택뿐만 아니라 열분해 및 삭마 반응을 정확히 이해해야 한다. 기술 선진국에서는 많은 실험을 통하여 모델링 식을 선정된 후에 재료의 열분해 반응 특성 값을 실험실 규모에서 확보하였으며 새롭게 합성 및 제조되는 신물질의 특성도 빠른 시간에 성능을 예측할 수 있도록 실험 방법이 표준화 되어있다 [1,2]. 열분해 반응을 표현하기 위하여 반응 속도 상수를 구하게 되며 이렇게 얻어진 상수 값은 재료의 열분해 특성치가 되며 열분해 모사 프로그램에 쓰이는 입력 자료가 된다. 반응속도 상수를 찾기 위한 이론 및 실험식은 대부분이 Arrhenius 식에 근거한 변형된 식을 이용해 오고 있으며 사용되는 기기 및 방법은 열중량분석기 (Thermal Gravimetry Analyzer)에 의한 열분석 방법을 이용해 오고 있다 [3]. 열중량법에 의한 열분석 방법은 시료의 중량 변화를 온도 및 시간의 함수로써 기록한 것이다. 본 연구는 TGA 장비를 이용하여 탄소/페놀릭 복합재료의 열분해로 인한 숯 형성 반응을 불활성 분위기에서 가열 속도를 변화시켜 얻은 열중량 곡선으로부터 열분해 현상과 분해 반응 특성 값을 구하였다[4]. 탄소입자의 표면 삭마 반응은 추진제 연소가스에 함유된 H₂O 와 CO₂ 에 의한 산화에 의한 반응으로 대표된다고 가정하였으며, 산화반응 속도는 Zvyagin 이론식[5]을 사용하였다.

모델의 유용성을 판단하기 위하여 범용 FEM 해석 코드인 MSC.Marc[6]를 사용하여 연소 중 노출 내열부품의 온도 분포를 예측하였으며, 내부 열반응 모델에서 얻어진 밀도 예측 곡선 및 삭마속도를 사용하여 시험 후 열분해 및 삭마깊이와 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 내열재료의 열분해 반응 기구

복합재료가 고온, 고압의 연소가스에 노출될 때 일어나는 열분해 현상은 복잡한 반응 기구를 나타낸다. 반응 초기엔 재료내부의 열전도에 의해 온도가 상승하고 작은 부피 팽창을 하게 된다. 재료 내부에 존재하는 수분과 경화되지 못한 물질의 확산 및 증발이 일어나고 온도가 550K 이상이 되면 열분해 반응은 재료 내부의 압력증가 및 열전도도 감소를 일으키는 분해가스를 발생 시키며 이는 내열재 표면에 결함을 일으키는 원인이 된다. 분해가스는 외부에 숯 층이 형성되면 숯 층의 온도 증가 때문에 탄소 증착이 이루어지며 이는 숯 층의 열전도 증가 효과를 이루게 된다. 또한 크래킹(cracking)에 의한 분해 반응이 일어나며 숯 층의 온도 상태 따라서 H₂, CO, CH 등 저분자 물질로 분해가 일어난다. Glass계열 복합재료인 경우에는 1000K 부근부터 액체 SiO₂는 탄화가스 (CO, CO₂)등과 반응을 하여 유입되는 열에너지를 흡수한다. 이 반응은 전체 화학반응에 의한 열에너지 흡수 중에서 약 70%이상을 차지하게 된다. 2000K 이상에서는 녹은 유리의 증발이 주요 분해반응이며 탄소성 복합재료는 산소 성분 화합물의 확산에 의한 화학적 삭마 반응이 반응 기구를 결정한다. 숯 층의 삭마는 산화에 의한 침식 및 기계적 요인으로 인한 강도저하로 원재료로부터 떨어져 나가는 과정을 겪는다(Fig. 1).

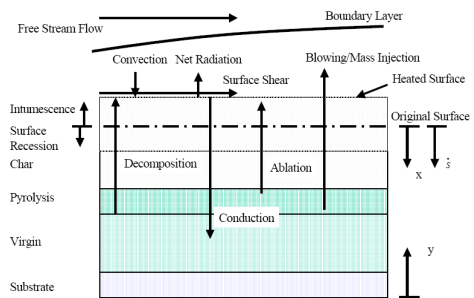


Fig. 1 Thermochemical Decomposition Phenomena

2.2 내부 열반응 모델

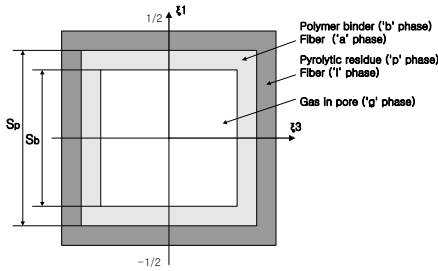


Fig. 2 Unit cell of composite

부피가 일정하다고 가정한 경우에 재료의 밀도 감소는 수지 및 섬유에서 발생하는 분해가스 생성에 기인하는 기공의 증가 때문이며 최종 밀도 값은 열분해 반응 후 형성된 숯 과 섬유의 부피함유율에 따라서 결정 된다 (Fig 2). 밀도가 감소하는 식은 Arrhenius 식에 근거하여 다음과 같은 미분방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = -\frac{J_0}{\rho_b} \Gamma (\rho_m - \rho_m^\infty) \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (1)$$

$t = 0, \quad \rho_m = \rho_m^0$

초기조건을 기준으로 식 (1)을 적분하면 아래와 같은 적분식이 얻어진다.

$$\frac{\rho_m}{\rho_m^0} = 1 - \Gamma + \Gamma \exp\left(-\frac{J_0}{\rho_b} \Gamma \int_0^t \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) d\tau\right) \quad (2)$$

TGA 실험에서 얻어진 중량 감소 곡선으로부터 활성화 에너지(E_A), 반응계수(J_0) 및 가스화율(Γ)이 얻어지며 이러한 반응인자는 온도 상승속도에 따라서 다르게 나타난다. 또한 중량 감소 곡선의 모양도 온도 상승속도가 증가함에 따라서 2단계 감소 반응에서 1단계 감소 반응으로 변하게 된다. 이는 온도 상승속도가 증가 할수록 복잡한 n차 또는 2차 반응에서 단순한 1차 반응으로 수렴되는 것을 보여준다.

3. 실험 및 고찰

3.1 열분해 특성 상수 결정

TGA(열중량분석기) 실험에 사용된 재료는 페놀릭 수지를 사용한 복합재료이며 열분해 특성은 Table 1에 보이는 바와 같다. 시편의 균일성을 확보하기 위하여 일정한 75~100 μ m 분말 크기로 제조하여 시험하였다. 온도상승 속도의 영향을 보기 위하여 5, 10, 15, 30 그리고 50 $^{\circ}$ C/min에서 실험하였으며 분석 구간은 페놀릭 수지의 분해가 일어나는 600K 부근에서 분해반응이 끝나는 1200K 로 정하였다.

Table 1. Characteristic of Carbon/Phenolic

밀도	섬유 분율	수지		반응속도 상수	
		분율	가스화율 (Γ)	활성화 에너지 (E_A)	반응 계수(J_0)
g/cm ³	%	%	%	K	1/sec
1.4	65	35	34	9.04×10^3	9.1×10^5

Figure 3에서와 같이 온도상승 속도가 증가함에 따라서 열분해 반응이 일어나는 구간은 높은 온도 쪽으로 이동하고 있다.

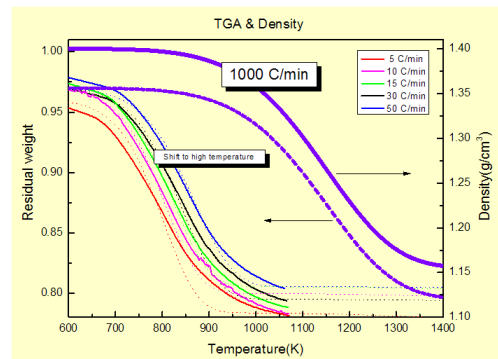


Fig. 3 중량 감소 곡선

3.2 FEM 해석 및 모델의 검증

해석 절차 및 사용된 모델의 검증을 위하여 다음과 같은 절차를 따랐다(Fig 4).

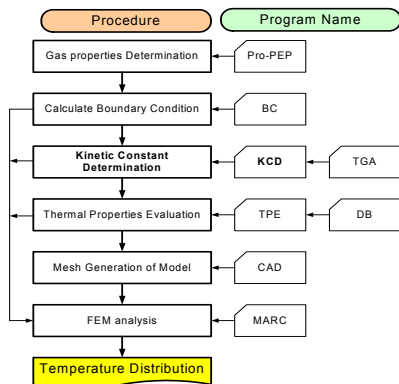


Fig. 4 Flow chart for FEM analysis

연소시험에 사용된 노즐 모델은 Fig. 5 와 같 으며, 온도 및 삭마 해석은 FEM 범용 해석코드 인 MSC.Marc 를 사용하였으며 해석된 결과는 Fig. 6 과 같다.

계산된 온도 분포를 근간으로 내열 복합재료 의 밀도분포를 구하였다. 해석의 목적은 삭마 및 숯 층 두께를 예측 하는 것이므로 연소실험 후 노즐을 절개하여 삭마 및 숯 층의 두께를 측정 하였다.

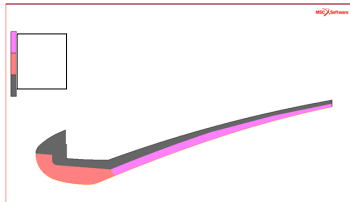


Fig. 5 노즐형상 모델

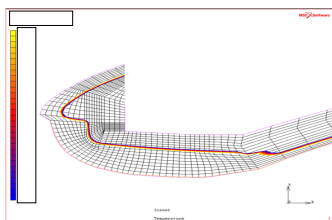


Fig. 6 숯 및 삭마라인

모델의 유효성은 연소 시험 후 측정된 내열재 의 열분해 깊이와 삭마 두께를 분석함으로써 확 인하고자 하였다. 밀도 변화곡선을 기준으로 노즐

내열재 부품의 내부에서 계산된 온도와 대응시켜 서 내열재의 밀도 분포를 예측 하였으며 (Fig. 7), 내열재 부품을 절단하여 열분해 깊이 실측치와 예측치를 비교하였다. 내부 열반응 모델을 기 준으 로 수행된 FEM 해석결과로부터 삭마 깊이는 $\pm 1\text{mm}$ 오차범위에서 예측이 가능한 것으로 나타 났으나 숯 층 깊이는 냉각 시점의 차이로 인하여 부위 별로 최대 20% 오차를 보인다 (Fig. 8).

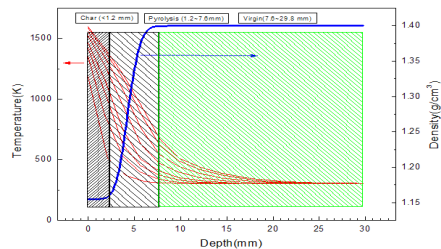


Fig. 7 계산된 온도 및 밀도 분포 곡선

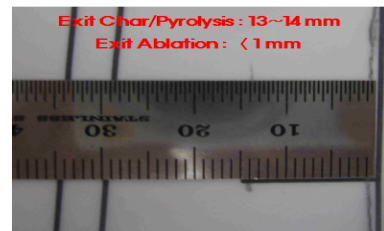


Fig. 8 숯 및 삭마 두께 측정

4. 결 론

열분해 및 삭마 모델을 활용하여 노즐 내열부 품의 2차원 숯 및 삭마 해석을 수행하였으며 모 델의 검증은 고체 추진기관의 연소시험을 통하 여 확인 하였다.

- 열분해가 일어나는 재료 내부의 온도분포를 FEM 해석 결과와 비교하여 모델의 유효성 을 확인하였다.
- 연소 시험 후 측정된 삭마 깊이는 예측된 값 과 $\pm 1\text{mm}$ 오차범위에서 일치하였으며 숯 층 두께는 냉각 시점의 차이로 인하여 최대 20%의 오차를 보인다.
- 상용해석 코드를 활용함으로써 2차원 숯 및 삭마 해석을 효율적으로 수행할 수 있다.